

전기기기 신뢰성 보증을 위한 가속수명시험 설계

김민규, 이정기, 김익수, 정주영
한국전기연구원

Design of Accelerated Life Testing for Reliability Assurance of Electrical Apparatus

M. K. Kim, J. G. Lee, I. S. Kim, J. Y. Jeong
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In general, ALT can be used to expect the lifetime of electric machines and accelerated stress testing(AST) is used to evaluate the residual life of insulation system. In this paper, a method to design the accelerated life testing(ALT) for reliability qualification of electrical apparatus is represented.

1. 서 론

제품이나 시스템에 신뢰성·안전성을 부여할 때는 고장모드영향분석(FMEA), 위험도분석(hazard analysis) 등의 각종 기술들이 사용되지만, 실제로 재료, 부품, 시제품, 완성품 등을 시험으로 확인할 필요가 있다. 시험은 대상(재료, 부품 등의 비회복계열, 장치, 시스템 등 회복계열)의 개발단계에서부터 실시된다. 시험의 목적이나 방법은 대상, 개발의 단계별로 달라진다. 매우 작은 재료나 부품, unit, 장치, sub-system, S/W, 인간을 포함한 시스템까지 그 크기, 규모가 크게 다르면, 고장의 원인도 다르게 되므로 시험방법, 시험장치, 시험시간 등도 바뀌어야 한다. 시험만 고려할 때 생산자 및 소비자가 취하는 입장은 서로 다르다. 그러나 어떤 경우에도 공통된 단계적인 절차는 존재한다.[1]

본 논문에서는 전기기기의 신뢰성 보증을 위해 실시하는 수명시험에서 시험시간의 단축을 목적으로 행해지는 가속시험의 설계를 위한 절차 및 각종 전기기기의 신뢰성보증 또는 인증에 적용되고 있는 신뢰성평가 내용에 대해 간략하게 서술한다.

2. 신뢰성평가 계획수립

신뢰성시험의 종류는 목적, 개발단계, 장소 및 가속의 여부에 따라 표 1과 같이 대별할 수 있다.

〈표 1〉 신뢰성시험의 종류

기준	내용
시험목적	<ul style="list-style-type: none"> • 신뢰도 적합시험; 아이템의 특성이 규정된 요구사항에 적합한지 여부 판정 • 신뢰도 결정시험; 아이템의 특성을 확인
적용단계	<ul style="list-style-type: none"> • 개발·성장시험 • 보증시험 • 신뢰성수락시험 • 변인(ESS)
시험장소	<ul style="list-style-type: none"> • 실험실시험; 규정되고 제어되는 조건에서 수행 • 현장시험; 운용, 환경, 측정조건들이 기록되는 현장에서 수행
가속여부	<ul style="list-style-type: none"> • 가속시험; 시험기간 단축을 위해 가혹한 스트레스 인가 시험 • 정상시험; 실 사용 인가되는 스트레스에서 수행

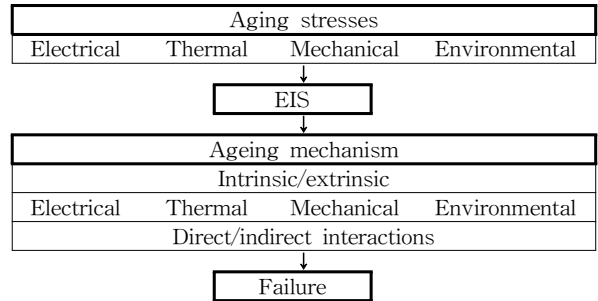
2.1 신뢰성시험 계획

신뢰성시험은 많은 비용과 시간이 소요되므로 기획단계에서부터 시험의 목적, 방법, 일정, 등을 규정한 신뢰성시험 계획을 수립하여야 한다. 과거의 경험, 데이터, 기술정보를 충분히 검토하고 분석하여 시험항목, 스트레스의 종류와 수준, 시료의 수, 시험기간, 측정파라미터와 방법 등을 결정해야한다.

또한 신뢰성평가 시험설비의 성능, 신뢰성 등의 검토와 고장분석 결과의 설계에 feedback 방법, 일정, 이상에 대한 처리방법 등을 고려해야하며, 시험계획서 고려해야할 요소들은 다음과 같다.

- 시험의 목적
- 아이템의 특성과 사용조건에 관한 정보
 - 기능, 성능의 규정과 고장의 정의
 - 부품·소재의 관련규격과 한계(온도범위, 강도, 열팽창 계수 등)

- 사용조건(전압, 온도, 습도 등)
- 고장에 관한 정보
 - 고장모드와 고장메커니즘에 관한 정보
 - 시장데이터 분석결과
 - 고장모드별 가속조건 및 가속모델
 - 고장메커니즘별 측정 파라미터
- 시험에 필요한 자원
 - 시험비용, 가용시험장비, 시험시간



〈그림 1〉 전기절연시스템의 열화[2]

가. 시험항목, 조건 및 순서결정

신뢰성시험을 실시하기 전에 어느 단계에서 어떤 시험을 실시할 것인가를 계획함으로써 불필요한 중복을 피하고 시험을 효과적으로 수행할 수 있다. 이를 위해서는 사용조건에서 문제가 되는 고장모드와 메커니즘, 고장에 영향을 미치는 스트레스와 그 수준을 고려하여 시험항목과 조건을 결정해야 한다.

(1) 시험항목 결정

산업과 아이템의 특성에 따라 표준화된 작용시험항목이 있을 수 있으며, 경우에 따라서는 user가 요구하는 경우도 있다. 시험항목은 일반적으로 고장에 따른 위험(risk)에 기초하여 결정하며, 이때 고장모드와 메커니즘에 대한 정보를 필요로 한다. 일반적으로 시험항목을 결정하는 지침은 다음과 같다.

- user가 요구하는 시험항목은 우선적으로 계획에 반영한다.
- 유사제품의 필드 데이터를 이용할 수 있다면, 수집된 데이터를 고장모드와 메커니즘으로 분류하고 신뢰도분석을 통하여 주요 고장모드와 메커니즘을 파악하고, 이를 검증하기 위한 시험항목을 결정한다.
- 설계 및 개발과정에서는 FMEA(고장모드영향분석, Failure mode effect analysis)를 통해 RPN(위험우선순위, Risk priority number)이 높은 고장모드와 메커니즘을 추출하고 이를 검증할 수 있는 항목들을 선정한다.
- 고장모드/메커니즘에 대한 기존의 정보가 없는 경우 아이템의 수명주기 동안에 예상되는 단계를 정의하고 각 단계에서 신뢰성에 영향을 줄 수 있는 예상 주요 인자를 선정한다.

(2) 시험조건 결정

아이템의 고장을 예방하고 재현하기 위해서는 사용조건을 대표할 수 있는 조건에서 시험을 실시해야한다. 시험조건을 결정할 때 고려해야할 사항은 다음과 같다.

- 사용조건은 대표 값뿐만 아니라 최고 또는 최저 온도와 같은 극한 조건의 값도 중요
- 동일한 제품이라도 지역과 계절에 따라 사용 환경과 인가되는 스트레스가 다르고, 사용·보전방법도 달라서 고장모드와 열화패턴이 변할 수 있다. 따라서 이러한 정보가 시험조건설정에 충분히 반영되도록 주의

(3) 시험순서의 결정

일반적으로 다음과 같은 순서로 시험을 실시한다.

- ① 온도급변시험은 초기에 실시한다.
- ② 온도급변시험 이후에 기계적 시험, 즉 진동, 충격, 가속도 등을 실시한다.
- ③ 저온 및 고온시험은 온도에 의한 영향을 확인하기 위해 시험 초기에 적용한다. 습도 사이클 시험은 크랙에 수분을 침투시키며, 그 효과는 저온 및 감압시험에 의해 촉진될 수 있다.
- ④ 습도(정상상태)시험은 전체 환경시험의 마지막에 실시한다.

(4) 측정 파라미터의 선정

측정파라미터는 고장메커니즘과 관련이 있으며, 측정이 용이하고 재현성이 높으며, 비용이 적게 드는 것이 바람직하다. 따라서 과거의 경험과 기술정보, 관련 고장메커니즘, 측정의 난이도와 회수 등을 고려하여 선정한다.

〈표 2〉 측정파라미터의 선정 예

장치	파라미터
<ul style="list-style-type: none"> • 코일, 솔레노이드 • IC • 소형모터 • 저항의 열화 • 스위치 	<ul style="list-style-type: none"> • 표면온도, 작동시간, 흡인력 • 누설전류, 출력파형, 단락 • 전류, 회전수, 표면온도, 진동, 소음 • 단락, 개방, 저항변화 • 절연저항, 접촉저항
<ul style="list-style-type: none"> • 크랙성장 • 기밀성 • Electro-migration 	<ul style="list-style-type: none"> • 초음파 검출 • 기포, 침투성, 절연저항 • 저항치 변동, 절연저항, 단락

(5) 측정간격

① 환경시험의 경우

비교적 단기간에 수행되는 환경시험에서는 시료의 시험 전 이력의 영향을 제거하거나 부분적으로 중화하기 위한 전처리(Pre-conditioning) 후에 초기 측정을 하고 환경시험 후에 최종 측정을 한다.

② 신뢰성시험의 경우

오랜 시간이 걸리는 신뢰성시험에서는 어느 시간대에 고장이 발생하고, 어느 시점 부근에서 성능이 변화하기 쉬우며, 또한 시간에 따른 아이템의 안정성과 변화 경향을 조사하기 위해 중간 측정이 필요하다. 시험조건에 따라 제습 또는 냉각시간이 필요하여 즉시 측정할 수 없는 경우에는 후처리를 위한 시간을 고려하여 측정시점을 결정한다.

2.2 시료수의 결정

신뢰성시험에서 가장 큰 문제의 하나가 시험에 많은 시간과 시료가 필요하다는 점이다. 즉 마모고장의 경우는 마모현상이 나타날 때까지 장기간의 시험을 해야 하고, 고장률이 작으면 많은 수의 시료가 필요하게 된다. 따라서 개발단계에서 적은 수의 시료로 신뢰성을 보증하고자 할 때 최대의 어려움이 있다.

(가) 고장률 보증시험

① 시료의 크기 또는 시험시간의 결정

고장시간이 지수분포를 따르는 n_0 개의 시료를 t_0 시간동안 시험하였을 때 고장이 r 개 발생하더라도 신뢰수준 $100(1-\alpha)\%$ 로 평균수명 θ_0 를 보증할 수 있는 시료수 또는 시험시간은 다음 식을 만족한다.

$$T_0 \geq \frac{\theta_0 \chi_{\alpha}^2(2r+2)}{2} \quad (1)$$

여기서, T_0 는 총 시험시간이며, $T_0 = n \times t_0$ 이고, $\chi_{\alpha}^2(2r+2)$ 는 자유도가 $2r+2$ 인 χ^2 분포의 $100(1-\alpha)\%$ 백분위수를 나타내며, r 은 허용고장수이다. 따라서 시험시간 t_0 이 주어지면 시료수 n_0 을 결정할 수 있고 반대로 시료수 n_0 가 주어지면 시험시간 t_0 을 결정할 수 있다.

지수분포를 따르는 경우 총 시험시간이 같으면 같은 정도로 신뢰성을 보증할 수 있다. 따라서 시험시간에 제약이 있으면, 시료수를 늘려 총 시험시간이 같도록 하면 동일한 신뢰성을 보증할 수 있다. 또한 가속계수를 알고 있는 경우 가속계수에 반비례하여 시료수와 시간을 줄일 수 있다.

(나) Weibull 수명분포를 따르는 가속수명시험[3]

아이템의 수명(T)이 형상모수 β , 척도모수가 η 인 Weibull 분포를 따르고 β 를 알고 있으면(또는 추정치가 가용하면), T^{β} 은 평균

수명이 η^{β} 인 지수분포를 따른다. 따라서 앞에서 구한 지수분포의 결과를 이용하여 Weibull 분포에서 시료수와 시험시간을 결정할 수 있다.

n_0 개의 시료를 정해진 기간 t_0 까지 시험을 하고, 고장이 r 개 발생하더라도 신뢰수준 $100(1-\alpha)\%$ 로 B_r 수명을 보증할 수 있는 시료 수 또는 시험시간은 다음의 식을 만족한다.

$$\left[\frac{2T}{\chi_{\alpha}^2(2r+2)} \times \ln(1-x)^{-1} \right]^{1/\beta} \geq t_0^* \quad (2)$$

여기서 $T = n \cdot t_0^{\beta}$ 이고, t_0^* 는 목표수명이다.

- 시험시간 t_0 가 주어져 있을 때, 시료수 n_0 의 결정

$$n \geq \left(\frac{t^*}{t_0} \right)^{\beta} \times \frac{\chi_{\alpha}^2(2r+2)}{2} \times \frac{1}{\ln(1-x)^{-1}} \quad (3)$$

표 3은 신뢰수준(60%, 90%), t^*/A_0 , β , r 값이 주어졌을 때, B_{10} 수명을 보증하는 시료 수를 구하기 위한 표이다.

〈표 3〉 B_{10} 수명 보증을 위한 시료수

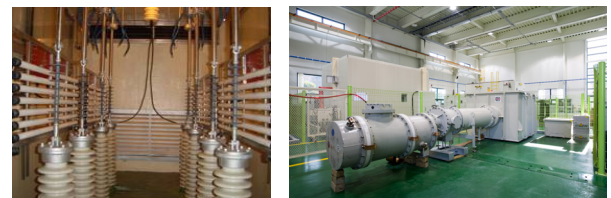
t^*/t_0	β	신뢰수준 : 60%				신뢰수준 : 90%			
		0	1	2	3	0	1	2	3
1.5	1	14	29	45	60	33	56	76	96
	2	20	44	67	90	50	84	114	143
	3	30	65	100	134	74	125	171	215
2.0	1	18	39	59	80	44	74	102	127
	2	35	77	118	159	88	148	203	254
	3	70	154	236	318	175	296	405	508

2.3 기기별 가속수명시험 기준

전기기기중에서 B_{10} 수명의 신뢰성보증을 위해 신뢰성평가기준(Reliability Standard; RS)에서 채택하고 있는 가속수명시험의 조건을 일부 아이টে에 대해 정리하면 표 4와 같다.

〈표 4〉 가속수명시험조건 및 가속수명시험시간

아이템	가속인자	시료수	가속모델	가속조건	가속시간
절연스페이서	전압	2개	Inverse power	1.6배	44일
가스개폐기	전압	2개	Inverse power	1.4배	130일
	온도	10개	Arrhenius	100°C	74일
전선복합기	온도	12개 × 3수준 = 36개	Arrhenius	240°C	35h/cycle×8 이상
				220°C	100h/cycle8 이상
				200°C	300h/cycle8 이상
MCCB	온도/습도/전압	5개	Peck*Inverse power[4,5]	85°C	25일
				85%	
				1.2배전압	



〈그림 2〉 가속수명시험 예, (a) 폴리머매자 복합가속 (b) 절연스페이서 전압가속

3. 결 론

본 논문에서는 전기기기 신뢰성보증을 위한 가속수명시험의 설계방안을 고찰해 보았다. 일반적으로 많은 비용과 장시간의 시험시간이 소요되는 신뢰성평가를 가능한 한 빠른 시간에 시험비용을 줄이면서 많은 자료를 일시에 획득하기 위해서는 사전에 신뢰성평가 대상 아이টে에 대한 치밀한 검토가 선행되어야 하며, 가능한 고장모드를 재현할 수 있는 방안을 모두 고려하여 시험설계를 추진해야 할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] "신뢰성시험 Guideline", 수원대학교 신뢰성혁신센터, 2004.
- [2] IEC 60505, "Evaluation and qualification of electrical insulation systems", 2004.
- [3] 서순근, "MINITAB 신뢰성분석", (주)이레케코, 2002.
- [4] M. Honda et al., "V-t Characteristics of Epoxy Mold Insulation for Sustained AC Voltages" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.5, pp 1017-1023, 1984.
- [5] Mario Cacciari, Gian Carlo Montanari "Optimum Design of Life Tests for Insulating Materials, Systems and Components", IEEE Trans. on EI Vol. 26, No.6, 1991.